

PENGARUH PERUBAHAN KONFIGURASI SALURAN JARINGAN SUTET 500 KV TERHADAP MEDAN MAGNET

Dedi Nugroho¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Sultan Agung Semarang
Jl. Raya Kaligawe km. 4 Semarang - Indonesia
email : Dedyoeg@yahoo.co.uk

ABSTRAK

Sistem pengiriman daya listrik melalui jaringan transmisi saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) memberikan berbagai keuntungan seperti pengiriman daya listrik lebih besar, kerugian daya bertambah kecil, keandalan tinggi, dan sebagainya, namun disisi lain telah menimbulkan kekhawatiran bagi kesehatan masyarakat khususnya yang tinggal dibawah atau disekitar SUTET akan efek negatif dari medan magnet yang ditimbulkan oleh SUTET tersebut. Berdasarkan hal itu badan organisasi kesehatan dunia (WHO) telah menetapkan batas ambang medan magnet adalah 0,3 mT, sementara PLN menetapkan 0,5 mT.

Ada berbagai teknik untuk menurunkan besarnya medan magnet dari SUTET yaitu diantaranya : mengubah susunan konfigurasi saluran, menambah ketinggian saluran, memperbesar ukuran konduktor dan memperkecil jarak konduktor antar fasa. Pada bahasan disini ditunjukkan perubahan konfigurasi saluran berakibat pada perubahan nilai-nilai kerapatan medan magnet dari berbagai jarak pengukura, sedangkan perhitungan kerapatan medan magnet didasarkan pada pemakaian metoda bayangan.

Berdasarkan hasil perhitungan ditunjukkan bahwa perubahan konfigurasi sistem saluran akan mempengaruhi besarnya kerapatan medan magnet. Dari hasil perhitungan untuk arus listrik 730 A yang mengalir pada empat buah sampel konfigurasi saluran berbeda terlihat bahwa nilai kerapatan medan magnet maksimum untuk masing-masing konfigurasi saluran adalah berbeda. Untuk konfigurasi horizontal tunggal kerapatan medan magnetmaksimu adalah 0,00938 mT, sedangkan berturut turut untuk susunan konfigurasi delta, ganda standar, dan ganda dengan perubahan letak fasa pada salah satu sirkuitnya adalah masing-masing 0,00636 mT, 0,00632 mT dan 0,01173 mT

Kata Kunci : Medan magnet, Konfigurasi saluran, SUTET

1. Pendahuluan

Penggunaan jaringan transmisi saluran udara dengan tegangan ekstra tinggi mempunyai banyak keuntungan diantaranya daya yang disalurkan semakin besar dan juga kerugian daya pada saluran transmisi dapat ditekan. Selain keuntungan ada juga kerugian dengan digunakannya SUTET, salah satunya adanya medan magnet yang ditimbulkan oleh penghantar yang dialiri arus listrik. Sistem transmisi dengan SUTET 500 kV telah diterapkan di Indonesia yaitu di Jawa yang menginterkoneksi seluruh sistem-sistem pembangkit tenaga listrik yang ada.

Dalam penggunaan tenaga listrik, arus listrik mengalir ke beban melalui saluran transmisi dan distribusi. Arus listrik yang mengalir pada saluran transmisi dan saluran distribusi akan menimbulkan medan magnet disekitar kawat penghantar. Kuat medan magnet tergantung pada besarnya muatan listrik pada partikel atau bergantung pada besarnya arus listrik yang mengalir pada penghantar tersebut. Kuat medan magnet akan semakin besar bila jarak terhadap penghantar semakin dekat dan semakin melemah bila jaraknya semakin jauh dari penghantar. Kuat medan magnet dinyatakan dalam Ampere per meter (A/m).

Medan magnet yang tinggi telah menimbulkan banyak kecemasan bagi kesehatan manusia, khususnya bagi mereka yang tinggal dibawah atau disekitar jaringan transmisi SUTET

tersebut. Sampai sekarang ini masyarakat masih merasa khawatir tinggal di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV. Ketakutan ini tampaknya berawal dari pernyataan para ahli epidemiologi bahwa SUTET dapat membangkitkan medan listrik dan medan magnet yang berpengaruh buruk terhadap kesehatan manusia. Kenyataan ini bukanlah sesuatu yang tak berdasar. Sebuah riset dilakukan selama 10 tahun terakhir oleh tim Bagian Biologi Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia berhasil membuktikan korelasi antara listrik dan beberapa penyakit. Mereka berhasil menemukan bahwa medan elektromagnetik yang ditimbulkan dari saluran kabel dan gardu listrik tegangan tinggi dan alat-alat listrik di rumah bisa beresiko terhadap kesehatan manusia. Ini timbul akibat rusak atau kacanya kerja jaringan hormonal tubuh karena adanya aliran listrik dari medan elektromagnetik tersebut yang menginduksi tubuh. Sebuah penelitian lain yang dilakukan oleh Kasnodiharjo dan Soesanto, peneliti dari Departemen Kesehatan RI di SUTET Cibinong dan Bekasi berhasil membedakan kelompok penduduk yang beresiko terpapar dan tidak terpapar berdasarkan jarak tempat tinggal dengan jaringan listrik terpasang. Hasilnya, radius 500 meter diperkirakan masih memiliki resiko terpapar.

Dalam rangka operasi Saluran Udara Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV perlu ditinjau dampak yang timbul. Salah satu dampak SUTET adalah medan elektromagnetik yang timbul di sekitar saluran tersebut, yang dalam batas-batas tertentu dapat berpengaruh pada kehidupan manusia ataupun binatang menetap.

World Health Organization (WHO) telah menetapkan kuat medan magnet sebesar 240 A/m atau 0,3 mT tidak mengganggu kesehatan manusia. Sedangkan PLN dalam Standar PLN (SPLN) 112:1994 menetapkan ambang batas medan magnet secara terus menerus adalah 0,5 mT.

Namun dengan meningkatnya kesadaran masyarakat tentang masalah keselamatan kerja dan keselamatan lingkungan, maka masalah transmisi udara dengan tegangan tinggi atau ekstra tinggi menjadi suatu persoalan yang harus diperhatikan dengan cermat apabila jaringan tegangan tinggi tersebut melewati daerah pemukiman. Apa yang menyebabkan masyarakat menjadi cemas bila daerahnya dilewati jaringan tegangan tinggi, tidak lain adalah karena rasa khawatir dan takut terkena radiasi tegangan tinggi yang dapat mempengaruhi kesehatan mereka.

2. Tujuan

1. Mempelajari pengaruh konfigurasi saluran jaringan SUTET 500 kV terhadap medan magnet
2. Menghitung nilai perubahan medan magnet terhadap perubahan konfigurasi saluran jaringan SUTET 500 kV

3. Medan Magnet

Medan magnet timbul dari gerakan muatan listrik seperti arus listrik. Medan magnet dipengaruhi gerakan dari perpindahan muatan. Kekuatannya diukur dalam satuan ampere per meter (A/m) tetapi dinyatakan dalam istilah yang sama dengan induksi magnetik yang terukur dalam satuan tesla (T), milli tesla (mT) atau mikro tesla (μ T). di beberapa negara dinyatakan dalam gauss (G) untuk menyatakan induksi magnetic, (10.000 G = 1 T ; 1 G = 100 μ T ; 1mT = 10 G ; 1 μ T = 10 mG). Peralatan yang dihubungkan dengan saluran listrik, ketika peralatan dinyalakan dan ada arus mengalir, akan mempunyai sekawan medan magnet yang sebanding dengan arus yang mengalir dari sumber menuju peralatan yang terhubung. Medan magnet terbesar terletak dekat dengan peralatan dan akan berkurang sesuai dengan jarak. Medan magnet tidak bisa terhalang oleh material biasa karena dapat melewati material tersebut dengan mudah.

Secara alamiah tingkatan medan listrik dan medan mempunyai frekuensi berkisar antara 50 – 60 Hz adalah sangat rendah, masing-masing antara 0,0001 V/m dan 0,00001 μ T. Tempat yang tidak terlindungi oleh medan ELF yang terutama adalah yang berhubungan dengan pembangkitan, transmisi

dan penggunaan energi listrik. Sumber dan batas medan ELF yang lebih tinggi ditemukan dalam lingkungan masyarakat. Energi listrik dari pusat pembangkit didistribusikan kemasyarakat melalui saluran transmisi tegangan tinggi. Transformator digunakan untuk menurunkan tegangan yang disalurkan ke saluran distribusi yang menyalurkan energi listrik ke pemukiman. Medan listrik dan medan magnet di bawah saluran transmisi masing-masing mencapai 12 Kv/m dan 30 μ T. Di sekitar pusat pembangkitan dan gardu induk, ditemukan medan listrik yang mencapai 16 Kv/m dan medan magnet mencapai 270 μ T.

3.1. Perhitungan Intensitas Medan Magnet dengan Metode Bayangan

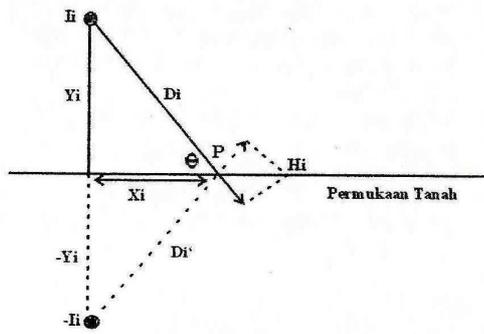
Perhitungan intensitas dan kerapatan medan magnet dapat dihitung melalui metode Bayangan. Bumi akan berpengaruh terhadap intensitas medan magnet yang dihasilkan oleh saluran transmisi. Apabila suatu penghantar diatas permukaan bumi dialiri arus listrik, maka akan dibangkitkan medan magnet pada penghantar tersebut. Dalam hal ini bumi merupakan penghantar, medan listrik tegak lurus permukaan penghantar dan medan magnet berpotongan saling tegak lurus terhadap medan listrik.

Jika bumi dimisalkan sebagai suatu plat penghantar yang luasnya tak terhingga, maka intensitas medan magnet akan dipaksa menyesuaikan dengan bumi. Dimisalkan suatu penghantar khayal yang identik dengan penghantar aslinya dan mempunyai jarak yang sama dengan penghantar asli terhadap bumi. Akan tetapi letak penghantar khayal tersebut dipihak yang berlawanan dengan penghantar asli. Jadi untuk perhitungan intensitas medan magnet di sekitar saluran transmisi, bumi dapat digantikan dengan penghantar khayal yang mempunyai muatan berlawanan.

Pada gambar 1 terdapat penghantar dan bumi yang digantikan dengan penghantar khayal. Jarak penghantar asli terhadap bumi adalah Y_i , begitu juga jarak penghantar khayal terhadap bumi adalah $-Y_i$. Kemudian terdapat titik P yang berjarak D_i terhadap penghantar asli dan berjarak D_i' terhadap penghantar khayal.

Maka intensitas medan magnet pada titik P adalah jumlah intensitas medan magnet yang ditimbulkan oleh masing-masing arus pada penghantar asli dan penghantar khayal. Jika arus pada penghantar asli adalah I_i dan arus pada penghantar khayal adalah $-I_i$, maka intensitas medan magnet di titik P adalah:

$$H_{res} = \frac{I_i}{2\pi D_i} + \frac{(-I_i)}{2\pi D_i'} \dots\dots\dots(1)$$



Gambar 1 Medan magnet yang ditimbulkan arus I_i dan bayangannya

dengan I_i adalah arus untuk penghantar ke - i. untuk aluran tiga fasa adalah arus pada tiap penghantar fasanya, bila besar arus dilambangkan dengan I dan masing-masing mempunyai perbedaan sudut fasa 120° , maka, masing-masing I akan sesuai dengan persamaan:

$$I = I (\cos\theta + j \sin\theta) \dots\dots\dots (2)$$

Sehingga:

$$I_A = I (\cos\theta + j \sin\theta) \dots\dots\dots (3)$$

$$I_A = I (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) \dots\dots\dots (4)$$

$$I_A = I (1 + j0) = I \dots\dots\dots (5)$$

$$I_B = I (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) \dots\dots\dots (6)$$

$$I_B = I (-0,5 + j0,866) \dots\dots\dots (7)$$

$$I_C = I (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) \dots\dots\dots (8)$$

$$I_C = I (-0,5 - j0,866) \dots\dots\dots (9)$$

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa jarak titik P terhadap penghantar asli adalah D_i , yaitu:

$$D_i^2 = X_i^2 + Y_i^2 \dots\dots\dots (10)$$

sehingga medan magnet akibat penghantar asli :

$$H_i = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i} \right) (-j) \dots\dots\dots (11)$$

$$H_i = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i} \right) (-j) (\cos\theta + j\sin\theta) \dots\dots\dots (12)$$

$$H_i = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i} \right) (-j \cos\theta + \sin\theta) \dots\dots\dots (13)$$

komponen horisontal :

$$H_i = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i} \right) (\sin\theta) \dots\dots\dots (14)$$

Sedangkan jarak titik P terhadap penghantar khayal sesuai dengan persamaan :

$$D_i'^2 = X_i^2 + (-Y_i)^2 \dots\dots\dots (15)$$

Maka medan magnet akibat penghantar khayal :

$$H_i' = \left(\frac{-I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i'} \right) (-j) \dots\dots\dots (16)$$

$$H_i' = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i'} \right) (j) (\cos\theta' + j\sin\theta') \dots\dots\dots (17)$$

$$H_i' = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i'} \right) (j \cos\theta' - \sin\theta') \dots\dots\dots (18)$$

komponen horisontal :

$$H_i' = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{D_i'} \right) (\sin\theta') \dots\dots\dots (19)$$

Jadi, intensitas medan magnet akibat penghantar asli dan penghantar khayal didapat resultannya yaitu:

$$Hh(i)res = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{1}{D_i} \sin\theta - \frac{1}{D_i'} \sin\theta' \right] \dots\dots\dots (20)$$

$$Hh(i)res = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{Y_i}{D_i \cdot D_i} - \frac{(-Y_i)}{D_i' \cdot D_i'} \right] \dots\dots\dots (21)$$

$$Hh(i)res = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{Y_i}{D_i^2} - \frac{(-Y_i)}{D_i'^2} \right] \dots\dots\dots (22)$$

$$Hh(i)res = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{Y_i}{D_i^2} + \frac{Y_i}{D_i'^2} \right] \dots\dots\dots (23)$$

Sesuai dengan persamaan (10) dan (14) bahwa :

$$D_i^2 = X_i^2 + Y_i^2$$

$$D_i'^2 = X_i^2 + (-Y_i)^2$$

maka persamaan di atas menjadi:

$$Hh(i)res = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{Y_i}{X_i^2 + Y_i^2} + \frac{Y_i}{X_i^2 + (-Y_i^2)} \right] \dots\dots\dots (24)$$

$$Hh(i)res = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{2Y_i}{X_i^2 + Y_i^2} \right] \dots\dots\dots (25)$$

Jadi, untuk menghitung intensitas medan magnet di atas permukaan tanah dapat digunakan persamaan :

$$H_i = \left(\frac{I_i}{2\pi} \right) \left[\frac{2Y_i}{X_i^2 + Y_i^2} \right] \dots\dots\dots(25)$$

dengan :

H = Intensitas medan magnet (A/m)

i = nama penghantar = A,B,C

Y = Tinggi penghantar dari permukaan tanah (m)

X = Jarak penghantar terhadap titik acuan (m)

Intensitas medan magnet total dapat diperoleh dengan menjumlahkan medan magnet yang ditimbulkan oleh masing-masing fasanya yaitu :

$$H_{total} = H_A + H_B + H_C \dots\dots\dots(26)$$

H_{total} merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bilangan ril dan imajiner.

$$H_{total} = H_r + jH_m \dots\dots\dots(27)$$

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_m^2} \dots\dots\dots(28)$$

dan kerapatan fluks magnet (B) pada titik tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$B = \mu_0 \cdot H \cdot 10^3 \text{ (mTesla)} \dots\dots\dots(29)$$

dengan :

μ_0 = Konstanta permeabilitas = $4\pi \cdot 10^{-7}$ (T.m/A)

H = Intensitas medan magnet (A/m)

4. Perhitungan Kerapatan Medan Magnet di Permukaan Tanah di Bawah SUTET 500 kV

Medan magnet yang dihitung adalah besar intensitas medan magnet pada permukaan tanah di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV arus bolak-balik. Jenis konfigurasi saluran transmisi udara yang digunakan adalah jenis konfigurasi tunggal horisontal dan konfigurasi ganda dengan tower tipe AA. Kedua jenis konfigurasi ini merupakan konfigurasi yang umum digunakan oleh P.T PLN sebagai penyelenggara ketenagalistrikan di Indonesia pada saat ini. Untuk menyederhanakan perhitungan digunakan asumsi asumsi sebagai berikut :

- Sistem yang dianalisis dalam keadaan operasi normal dan diasumsikan beban dalam keadaan seimbang.
- Tanah dianggap sebagai permukaan yang datar, bertegangan nol dan dianggap sebagai penghantar yang sempurna.
- Dalam perhitungan tidak memandang bahwa konduktor sebagai konduktor berkas. Tinggi konduktor diambil dari titik terendah dengan tanah sesuai dengan data yang didapat.

- Pengaruh bangunan-bangunan, pohon atau yang bersifat melindungi secara alamiah yang berada dibawah maupun disekitar SUTET diabaikan.

- Intensitas medan magnet akibat sebuah penghantar yang sangat panjang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$H = \frac{I}{2\pi R} \text{ A/m} \dots\dots\dots(30)$$

dengan :

H = Intensitas medan magnet (A/m)

I = Arus yang mengalir melalui penghantar (A)

R = Jarak radial penghantar ke titik yang dituju (m)

Dengan bantuan metode bayangan kita dapat menghitung besar intensitas medan magnet.

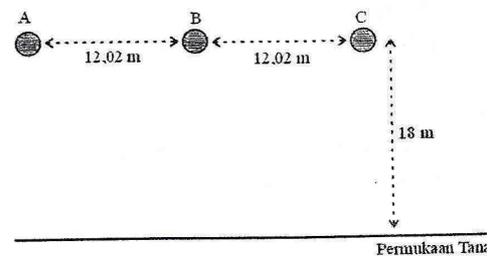
4.1 Perhitungan Pada Konfigurasi Tunggal Horisontal

Sebagai ilustrasi berikut ini diberikan suatu jaringan transmisi SUTET 500 kV dengan konfigurasi tunggal horisontal dengan data-data saluran sebagai berikut :

Data saluran :

- Tegangan fasa ke fasa = 500 kV
- Arus yang mengalir pada konduktor per fasa = 730 A
- Jarak konduktor antar fasa terdekat = 12,02 m
- Jarak konduktor terendah ke permukaan tanah = 18 m
- Jenis konduktor = ACSR (DOVE)

gambar saluran transmisi konfigurasi tunggal horisontal seperti pada gambar 2 :



Gambar 2 Konfigurasi Saluran Sirkuit Tunggal Horisontal

Jarak tiap penghantar ke permukaan tanah tiap fasa adalah sama yaitu:

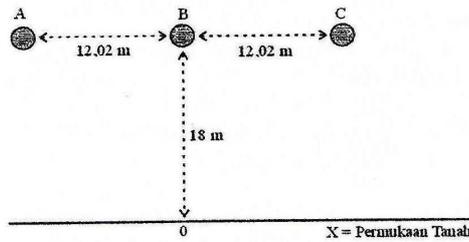
$$Y_A = Y_B = Y_C = 18 \text{ m}$$

Titik 0 (nol) diambil tepat di bawah kawat konduktor B, maka untuk menghitung intensitas

medan magnet di titik 0 dengan X untuk masing-masing kawat adalah:

- $X_A = 12,02 \text{ m}$
- $X_B = 0 \text{ m}$
- $X_C = 12,02 \text{ m}$

Gambar letak X yang menyatakan suatu titik di bawah konfigurasi tunggal horisontal sesuai dengan data di atas dapat dilihat pada gambar 3 :



Gambar 3. X menyatakan suatu titik di permukaan tanah

Dengan mengingat bahwa arus yang mengalir adalah arus tiga fasa maka sesuai dengan persamaan (5), (7) dan (9), arus yang mengalir pada tiap fasa adalah sebagai berikut:

- $I_A = I(1 + j0) = 730 \text{ A}$
- $I_B = 730 (-0,5 + j0,866) \text{ A}$
- $I_C = 730 (-0,5 - j0,866) \text{ A}$

Data yang kita peroleh dapat disubstitusikan ke persamaan (25) dan (29) sehingga diperoleh nilai kerapatan medan magnet B untuk posisi berbagai jarak pengukuran diatas atas permukaan tanah seperti terlihat dalam tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 Hasil perhitungan kerapatan medan listrik B untuk susunan konfigurasi horizontal tunggal

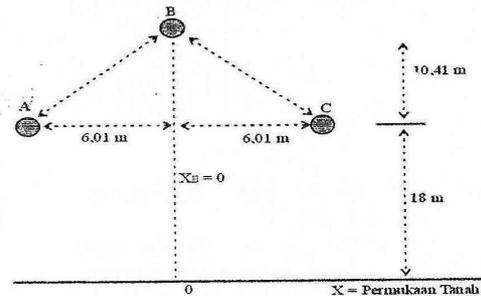
Jarak Pengukuran (m)	B Horizontal (mT)
-30	0,00204
-25	0,00667
-20	0,00847
-15	0,00938
-10	0,00832
-5	0,00606
0	0,0050
5	0,00606
10	0,00832
15	0,00938
20	0,00847
25	0,00667
30	0,00204

4.2 Perhitungan pada Konfigurasi Tunggal Delta

Konfigurasi tunggal delta adalah sebagai upaya meminimumkan pengaruh medan magnet dari konfigurasi tunggal horisontal pada jaringan 500 kV. Besar intensitas medan magnet pada permukaan tanah di bawah jaringan 500 kV konfigurasi tunggal telah dibahas pada bagian 3.3.1. Sekarang dengan adanya perubahan konfigurasi, yaitu dengan konfigurasi tunggal delta dan dengan menggunakan data yang sama dapat diketahui hasilnya dibawah ini. Data saluran :

- Tegangan fasa ke fasa = 500 kV
- Arus yang mengalir pada konduktor per fasa = 730 A
- Jarak konduktor antar fasa terdekat = 12,02 m
- Jarak konduktor terendah ke permukaan tanah = 18 m
- Jenis konduktor = ACSR (DOVE)

Gambar saluran dengan konfigurasi tunggal delta dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4 Konfigurasi Tunggal Delta (*Equilateral Delta*)

Jarak ketiga penghantar ke permukaan tanah adalah:

- $Y_A = Y_C = 18 \text{ m}$
- $Y_B = 28,41 \text{ m}$

Bila kita mengambil titik 0 (nol) tepat di bawah penghantar konduktor fasa B, maka untuk menghitung besar intensitas medan magnet di titik 0 (nol) dengan X untuk masing-masing penghantar fasa adalah:

- $X_A = 6,01 \text{ m}$
- $X_B = 0$
- $X_C = 6,01 \text{ m}$

Arus yang mengalir adalah arus tiga fasa maka sesuai dengan persamaan (5), (7) dan (9), arus yang mengalir pada tiap fasa adalah sebagai berikut:

- $I_A = I(1 + j0) = 730 \text{ A}$
- $I_B = 730 (-0,5 + j0,866) \text{ A}$
- $I_C = 730 (-0,5 - j0,866) \text{ A}$

Dengan cara perhitungan yang sama seperti pada point 4.1 diatas maka diperoleh nilai kerapatan medan magnet B untuk posisi berbagai jarak pengukuran diatas atas permukaan tanah seperti terlihat dalam tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2 Hasil perhitungan kerapatan medan listrik B untuk susunan konfigurasi tunggal delta

Jarak Pengukuran (m)	B Delta (mT)
-30	0,00227
-25	0,00310
-20	0,00428
-15	0,00562
-10	0,00636
-5	0,00551
0	0,00431
5	0,00551
10	0,00636
15	0,00562
20	0,00428
25	0,00310
30	0,00227

4.3. Perhitungan pada Konfigurasi Ganda Standar 500 kV

Konfigurasi ganda standar secara umum banyak digunakan dalam sistem transmisi SUTET karena dapat menyalurkan daya listrik yang tinggi. Berikut ini akan dihitung kerapatan medan magnet dengan data saluran adalah :

- Tegangan fasa ke fasa = 500 kV
- Arus yang mengalir pada konduktor per fasa = 730 A
- Jenis konduktor = ACSR (DOVE)
- Jarak antar konduktor horisontal
 - Fasa $A_1 - A_2 = 14,4 \text{ m}$
 - Fasa $B_1 - B_2 = 15,2 \text{ m}$
 - Fasa $C_1 - C_2 = 16,4 \text{ m}$
- Jarak antar konduktor vertikal
 - Fasa $A_1 - B_1 = 12,02 \text{ m}$
 - Fasa $B_1 - C_1 = 12,02 \text{ m}$
 - Fasa $A_2 - B_2 = 12,02 \text{ m}$
 - Fasa $B_2 - C_2 = 12,02 \text{ m}$
- Jarak terendah konduktor ke permukaan tanah
 - Fasa $C_1 - \text{permukaan tanah} = 18 \text{ m}$
 - Fasa $C_2 - \text{permukaan tanah} = 18 \text{ m}$
- Jarak masing-masing kawat fasa ke permukaan tanah adalah :
 - $Y_{A1} = Y_{A2} = 42,04 \text{ m}$
 - $Y_{B1} = Y_{B2} = 30,02 \text{ m}$
 - $Y_{C1} = Y_{C2} = 18 \text{ m}$

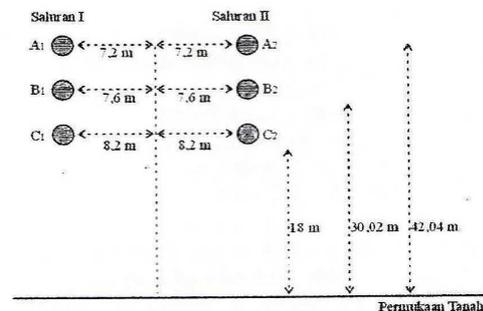
Bila kita mengambil titik 0 tepat di tengah saluran atau menara, maka untuk menghitung besar intensitas medan magnet di titik tengah dengan X untuk masing-masing fasa adalah :

- $X_{A1} = -7,2 \text{ m}$
- $X_{A2} = 7,2 \text{ m}$
- $X_{B1} = -7,6 \text{ m}$
- $X_{B2} = 7,6 \text{ m}$
- $X_{C1} = -8,2 \text{ m}$
- $X_{C2} = 8,2 \text{ m}$

Arus yang mengalir adalah arus tiga fasa maka sesuai dengan persamaan (3.3), (3.4) dan (3.5), arus yang mengalir pada tiap fasa adalah sebagai berikut:

- $I_A = I(1 + j0) = 730 \text{ A}$
- $I_B = 730 (-0,5 + j0,866) \text{ A}$
- $I_C = 730 (-0,5 - j0,866) \text{ A}$

Gambar 5 melukiskan saluran dengan menggunakan konfigurasi standar dapat dilihat seperti berikut:



Gambar 5 Konfigurasi Ganda Standar

Pada sirkuit ganda tiga fasa mempunyai dua konduktor paralel per fasa dan terbagi rata antar kedua konduktor. Fasa A_1 sefasa dengan fasa A_2 , fasa B_1 sefasa dengan fasa B_2 dan fasa C_1 sefasa dengan fasa C_2 , maka arus yang mengalir di setiap konduktor (A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 dan C_2) adalah 730 A. Hasil – hasil perhitungan kerapatan medan magnet untuk berbagai jarak pengukuran dalam konfigurasi ganda standar diberikan pada tabel 3.3 dibawah ini.

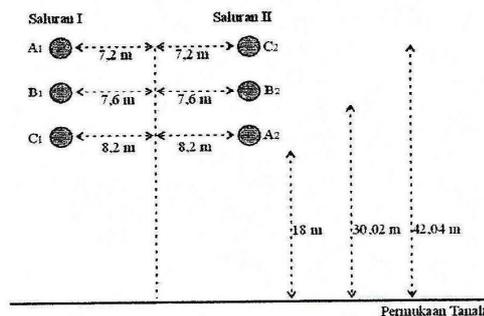
Tabel 3 Hasil perhitungan kerapatan medan listrik B untuk susunan konfigurasi ganda standar

Jarak Pengukuran (m)	B Ganda Standar (mT)
-30	0,00068
-25	0,00185
-20	0,00414
-15	0,00710
-10	0,00984
-5	0,01136
0	0,01173

5	0,01136
10	0,00984
15	0,00710
20	0,00414
25	0,00185
30	0,00068

4.4. Perhitungan pada Konfigurasi Ganda 500 kV dengan Merubah Tata Letak Fasa

Perubahan tata letak fasa pada konfigurasi ganda diharapkan akan menurunkan intensitas medan magnet di permukaan tanah. Perubahan tata letak fasa dilakukan pada urutan fasa saluran ke dua seperti pada gambar berikut:



Gambar 6 Konfigurasi Ganda dengan Merubah Tata Letak Fasa

Data saluran :

- Tegangan fasa ke fasa = 500 kV
- Arus yang mengalir pada konduktor per fasa = 730 A
- Jenis konduktor = ACSR (DOVE)
- Jarak antar konduktor horisontal
 - Fasa $A_1 - C_2 = 14,4$ m
 - Fasa $B_1 - B_2 = 15,2$ m
 - Fasa $C_1 - A_2 = 16,4$ m
- Jarak antar konduktor vertikal
 - Fasa $A_1 - B_1 = 12,02$ m
 - Fasa $B_1 - C_1 = 12,02$ m
 - Fasa $A_2 - B_2 = 12,02$ m
 - Fasa $B_2 - C_2 = 12,02$ m
- Jarak terendah konduktor ke permukaan tanah
 - Fasa C_1 – permukaan tanah = 18 m
 - Fasa A_2 – permukaan tanah = 18 m
- Jarak masing-masing kawat fasa ke permukaan tanah adalah :
 - $Y_{A1} = Y_{C2} = 42,04$ m
 - $Y_{B1} = Y_{B2} = 30,02$ m
 - $Y_{C1} = Y_{A2} = 18$ m

Bila kita mengambil titik 0 tepat di tengah saluran atau menara, maka untuk menghitung besar intensitas medan magnet di titik tengah dengan X untuk masing-masing fasa adalah :

- $X_{A1} = -7,2$ m
- $X_{C2} = 7,2$ m
- $X_{B1} = -7,6$ m
- $X_{B2} = 7,6$ m
- $X_{C1} = -8,2$ m
- $X_{A2} = 8,2$ m

Arus yang mengalir adalah arus tiga fasa maka sesuai dengan persamaan (5), (7) dan (9), arus yang mengalir pada tiap fasa adalah sebagai berikut:

- $I_A = I(1 + j0) = 730$ A
- $I_B = 730(-0,5 + j0,866)$ A
- $I_C = 730(-0,5 - j0,866)$ A

Dengan data-data diatas dapat dihitung besarnya kerapatan medan magnet melalui cara seperti pada point diatas, hasil-hasil perhitungan ditunjukkan dalam tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4 Hasil perhitungan kerapatan medan listrik B untuk susunan konfigurasi ganda dengan mengubah letak fasa

Jarak Pengukuran (m)	B Ganda Dengan Merubah Tata Letak Fasa (mT)
-30	0,00197
-25	0,00303
-20	0,00494
-15	0,00596
-10	0,00632
-5	0,00448
0	0,00239
5	0,00448
10	0,00632
15	0,00596
20	0,00494
25	0,00303
30	0,00197

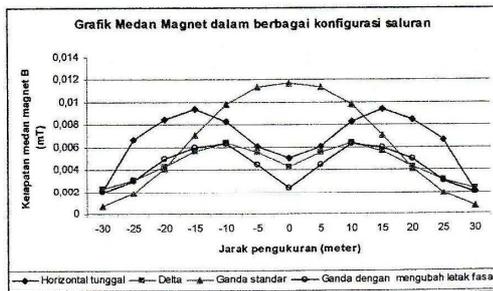
5. Pembahasan

Berdasarkan hasil-hasil perhitungan kerapatan medan magnet untuk berbagai konfigurasi saluran diperoleh hasil yang berlainan satu sama lainnya, hal ini mengindikasikan bahwa susunan konfigurasi saluran akan mempengaruhi besarnya kerapatan medan magnet. Pada tabel 4.1 dibawah ini memperlihatkan perbandingan nilai-nilai kerapatan medan magnet magnet untuk berbagai konfigurasi

Tabel 5 Perbandingan kerapatan medan magnet B untuk berbagai macam konfigurasi saluran transmisi

Jarak Pengukuran (m)	B (mT) (Horizontal)	B (mT) (Delta)	B (mT) Ganda Standar	B (mT) Ganda Dengan Merubah Tata Letak Fasa
-30	0,00204	0,00227	0,00068	0,00197
-25	0,00667	0,00310	0,00185	0,00303
-20	0,00847	0,00428	0,00414	0,00494
-15	0,00938	0,00562	0,00710	0,00596
-10	0,00832	0,00636	0,00984	0,00632
-5	0,00606	0,00551	0,01136	0,00448
0	0,005	0,00431	0,01173	0,00239
5	0,00606	0,00551	0,01136	0,00448
10	0,00832	0,00636	0,00984	0,00632
15	0,00938	0,00562	0,00710	0,00596
20	0,00847	0,00428	0,00414	0,00494
25	0,00667	0,00310	0,00185	0,00303
30	0,00204	0,00227	0,00068	0,00197

Untuk memperjelas karakteristik kerapatan medan magnet B untuk berbagai macam jarak pengukuran dan konfigurasi berbagai saluran, maka data-data tersebut diplot kedalam suatu grafik perbandingan sebagaimana terlihat dalam gambar 7 dibawah ini. Dari grafik tersebut terlihat karakteristik medan magnet untuk berbagai jenis konfigurasi. Untuk susunan konfigurasi horizontal tunggal, delta dan ganda dengan mengubah letak susunan fasa pada salah satu salurannya terlihat memiliki karakteristik dasar yang sama, namun yang membedakan adalah besarnya nilai-nilai kerapatan medan magnet pada setiap titik pengukuran. Diantara ketiga susunan konfigurasi tersebut diatas, konfigurasi horizontal tunggal memiliki nilai kerapatan medan magnet tertinggi, yaitu pada titik acuan 0 meter memiliki kerapatan medan magnet 0,005 mT, sedangkan untuk konfigurasi delta 0,00431 mT, dan untuk konfigurasi ganda dengan mengubah susunan letak fasa adalah 0,00239 mT.



Gambar 7 Grafik karakteristik medan magnet dalam berbagai konfigurasi saluran transmisi

Besarnya medan magnet mengalami kenaikan saat jarak titik pengukuran diambil mendekati fasa A dan fasa C, dan mencapai maksimum pada jarak titik pengukuran berdekatan dengan fasa A dan fasa C. Untuk konfigurasi horizontal tunggal medan listrik mencapai nilai maksimum

Pada konfigurasi horizontal standar memiliki nilai medan magnet maksimum yaitu 0,00938 mT pada jarak titik pengukuran 15 meter (jarak fasa A dan B adalah 12,02 meter). Untuk konfigurasi delta adalah 0,00636 mT pada jarak pengukuran 10 meter (jarak fasa A dan B adalah 6,01 meter), pada konfigurasi ganda dengan perubahan fasa pada salah satu salurannya memiliki nilai medan magnet maksimum 0,00632 mT. Selanjutnya untuk jarak titik – titik pengukuran diatas itu (semakin jauh dari fasa) kerapatan medan magnetnya semakin kecil atau melemah.

Pada konfigurasi ganda standar nilai kerapatan medan magnet maksimum 0,01173 mT yang berada pada posisi jarak titik pengukuran nol meter dari titik acuan (kondisi ini berbeda dengan ketiga konfigurasi lainnya), dan kerapatan medan magnet semakin kecil atau melemah pada titik-titik pengukuran yang semakin jauh dari titik acuan.

Berdasarkan hasil perhitungan diatas terlihat bahwa dengan sistem saluran transmisi dialiri arus 730 Ampere, menunjukkan bahwa kerapatan medan magnet masih dibawah batas ambang yang ditetapkan baik oleh WHO maupun PLN. Kerapatan medan magnet bergantung pada khususnya pada arus yang mengalir pada saluran. Jadi besarnya medan magnet tidak dipengaruhi oleh besarnya tegangan listrik, akan tetapi jika tegangan transmisi dinaikkan ketinggian tegangan yang lebih tinggi, maka kapasitas penyaluran daya listrik semakin tinggi, akibatnya arus mengalir dalam saluran semakin tinggi, dan berakibat pada naiknya medan magnet.

Memperhatikan data-data hasil perhitungan, terlihat bahwa perubahan konfigurasi saluran dapat mempengaruhi nilai medan magnet. Dari keempat konfigurasi yang diambil sebagai sampel tersebut dengan asumsi besarnya arus yang mengalir pada fasa saluran sama, terlihat bahwa konfigurasi ganda dengan perubahan letak fasa pada salah satu sirkuit saluran menunjukkan bahwa kerapatan medan magnet terendah. Nilai Medan magnet maksimum diperoleh pada sistem saluran ganda standar yang terletak pada titik pusat pengukuran, namun keadaan menjadi berbalik saat titik pengukuran diambil semakin jauh dari titik acuan maka kerapatan medan magnet menjadi terendah dibandingkan ketiga konfigurasi lainnya.

6. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik pada pembahasan ini adalah :

1. Perubahan sistem konfigurasi saluran akan mempengaruhi besarnya medan magnet yang melingkupi saluran tersebut. Pada sistem saluran tunggal dengan susunan horizontal, besarnya kerapatan medan magnet dapat diperkecil dengan mengubah konfigurasi horizontal tersebut dengan konfigurasi delta. Pada saluran ganda standar, besarnya kerapatan medan magnet dapat dikurangi dengan mengubah susunan letak fasa (penukaran fasa A dengan fasa C) pada salah satu sirkuit salurannya.
2. Pada dasarnya tegangan sistem tidak mempengaruhi besarnya medan magnet, karena medan magnet secara signifikan dipengaruhi oleh arus listrik yang mengalir pada saluran, namun dengan semakin tinggi tegangan saluran akan menyebabkan semaik besarnya kapasitas arus yang mengalir pada saluran, hal ini akan berdampak pada meningkatnya medan magnet disekitar saluran tersebut.
3. Karakteristik kerapatan medan listrik untuk saluran horizontal tunggal, delta dan ganda dengan mengubah tata letak fasa pada salah satu salurannya menunjukkan pola kecenderungan yang sama, namun karakteristik ini berbeda untuk susunan konfigurasi ganda standar.

7. Daftar Pustaka

1. Alonso, Marcello, (1983). " *Fundamental University Physics, Volume Two, Fields and Waves*", Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Canada.
2. Arismunandar Artono, (1993), " *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid Kedua Saluran Transmisi*", Pradnya Paramita, Jakarta.
3. D.W. Deno and L.E. Zaffanella,(1982)," *Transmission Lines Reference Book 345 kV And Above*, Electric Power Research Institute, California.
4. Edmister Joseph A., (1990), " *Elektromagnetika*", Terjemahan, Murjono, Erlangga, Jakarta, .
5. Francis Weston Sears, " *Electricity And Magnetism*", Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Canada.
6. Gonen, Turan (1988), " *Electric power Transmission System Engineering*", Weley-Interscience Publication, John Wiley and Sons Inc, Canada.
7. Hayt, William H, Jr,(1997) " *Elektromagnetika Teknologi*", alih bahasa The How Liong, Edisi Kelima, Erlangga, Jakarta,
8. Hutauruk, T.S,(1993), " *Transmisi Daya Listrik*", Erlangga, Jakarta.
9. JHA, R.S, *High Voltage Engineering*, Departement Of Electrical, Engineering Bihar Institute of Technology, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi.
10. Marsudi, D.(1990), *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Balai Penerbit dan Humas ISTN, Jakarta.
11. PT. PLN (Persero), SPLN 112 : 1(994), *Ambang Batas Kuat Medan Listrik Dan Induksi Medan Magnet Dibawah Saluran Tegangan Tinggi Dan Ekstra Tinggi*, Jakarta
12. Rakosh Das Begamudre (1987), " *Extra High Voltage AC Transmission Engineering* ", Wiley Eastren Limited , New Delhi.
13. Salam, M. Abdel, (1999), " *Calculation Of Magnetic Fields from Electric Power Trasmision Lines*", Electronic Power System Research.
14. Stevenson, William, D, Jr (1993), " *Analisa Sistem Tenaga*", Terjemahan, Kamal Idris, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta..
15. Theraja, B.L,(1986), " *Electrical Technology* ", Nirja Construction and Development CO. (P) LTD, Ram Nagar, New Delhi.
16. Wardhana, Wisnu Arya, (1997) Masalah Radiasi Tegangan Tinggi, www.elektroindonesia.com, Juli.